08

Изменение уровня поверхности германия с формированием тонкого пористого слоя при облучении ионами висмута

© А.Л. Степанов, А.М. Рогов, В.Ф. Сотникова, В.Ф. Валеев, В.И. Нуждин, Д.А. Коновалов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия
E-mail: aanstep@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 октября 2025 г.
В окончательной редакции 10 ноября 2025 г.
Принято к публикации 10 ноября 2025 г.

Проведен анализ характера изменения уровня поверхности монокристаллической подложки c-Ge, облучаемой ионами $^{209}Bi^{++}$ с энергией $E = 36$ keV, при образовании тонких поверхностных слоев нанопористого Ge с ростом ионной дозы. Значения дозы варьировались от $2.0 \cdot 10^{14}$ до $4.0 \cdot 10^{16}$ ion/cm^2. Наблюдение морфологии поверхности образцов выполнено методами высокоразрешающей сканирующей электронной и зондовой микроскопии. Установлено, что при малых дозах до $1.0 \cdot 10^{15}$ ion/cm^2 происходит ионное распыление поверхности образца и образуется слой, состоящий из открытых поверхностных пор в виде ямок. С ростом дозы распыление сменяется распуханием поверхности с формированием нанопористой губчатой нитевидной структуры.

Ключевые слова: нанопористый германий, ионное облучение, распыление, вспучивание.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.05.62335.20532

Методики классического ионного распыления и травления [1], обработки фокусированным ионным пучком [2], а также ионной имплантации [3], базирующиеся на эффектах взаимодействия ускоренных ионов с веществом, являются основными современными ионно-лучевыми технологиями. Как правило, ионное распыление, приводящее к разрушению облучаемой поверхности и удалению ее части, проводится при малых энергиях E порядка 0.5–30 keV [4]. Для низкоэнергетической ионной имплантации ($E \leqslant 300$ keV), осуществляющей глубинное внедрение примесных ионов в матрицу, следует ожидать модификации поверхности, схожей с происходящей в процессе ионного распыления. Однако в научной литературе процессы, описывающие ионное распыление и ионную имплантацию, обсуждаются чаще всего независимо друг от друга. В то же время определяющие физические эффекты, проявляющиеся при столкновениях и торможении первичных частиц с атомами матрицы, в основе своей являются схожими. Имеющиеся различия в процессах задаются конкретными условиями и параметрами ионного облучения, такими как энергия (E) и тип иона, доза (D), плотность тока в ионном пучке (J), температура облучаемой подложки (T_{subst}), ее структура, химический состав и др.

Можно отметить, например, что число публикаций для массово используемого в микро- и оптоэлектронике полупроводникового материала Ge [5] по детализации процессов ионного облучения при низкой E, близкой к ~ 30 keV, т. е. на границе эффектов ионного распыления и ионной имплантации, очень мало. Поэтому в настоящей работе в эксперименте по низкоэнергетическому облучению рассмотрены эффекты модификации поверхности монокристаллического c-Ge при комнатной температуре в зависимости от D. Особенности матрицы Ge заключаются в том, что при взаимодействии с ионами при определенных условиях может происходить не только ее распыление, но и образование распухающего слоя нанопористого германия (NPGe) [6]. Результаты исследования возможных сценариев модификации поверхности на примере подложек c-Ge являются актуальными, поскольку процессы распыления и порообразования при ионном облучении наблюдались также и для ряда других полупроводников, например GaAs [7], GaN [8], GaSb [9] и Si [10].

В качестве первичных ионов для облучения c-Ge в настоящей работе используются тяжелые частицы $^{209}Bi^{++}$ с $E = 36$ keV, которые обладают большой массой, характеризуются малой глубиной проникновения и значительным разрушением облучаемой мишени. На практике облучение данными ионами традиционно используется для изучения различных радиационных эффектов при низких E не только в Ge [4,11,12], но и в других полупроводниках, например Si, GaP, GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP [1,4].

В работе были использованы полированные подложки c-Ge марки ГДГ-45 толщиной 0.5 mm с кристаллографической ориентацией (111). Облучение проводилось ионами $^{209}Bi^{++}$ с $E = 36$ keV, D от $2.0 \cdot 10^{14}$ до $4.0 \cdot 10^{16}$ ion/cm^2 и $J = 5\,\mu$A/cm^2 на ионном ускорителе ИЛУ-3 при начальной комнатной температуре подложки c-Ge и нормальном падении пучка ионов на поверхность образца через поверхностную маску — медную сетку с размером квадратных ячеек 40 μm. Для контроля температуры поверхности облучаемого образца была использована оригинальная конструкция нагревательного элемента для вакуумной камеры ускорителя [13]. Локальная морфология и структура поверхности имплантированного c-Ge были исследованы на

сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss), а также на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Dimension FastScan (Bruker). СЭМ был оснащен детектором дифракции отраженных электронов HKL NordLys (Oxford Instruments).

Распределение имплантируемой примеси в объеме Ge, облучаемого ионами $^{209}Bi^{++}$ с $E = 36\,\text{keV}$, было промоделировано с использованием компьютерной программы DYNA, физические принципы расчета которой описаны в работе [14]. В программе приняты во внимание динамические изменения химического состава приповерхностного слоя облучаемой матрицы, а также учитывается ее ионное распыление. На основе расчетов установлено, что примесные атомы $^{209}Bi^{++}$ располагаются от поверхности в объем Ge по гауссовой кривой с максимумом на глубине $R_p \sim 14.4\,\text{nm}$ с разбросом пробега ионов от R_p, равным $\Delta R_p \sim 4.9\,\text{nm}$. При этом толщина легированного слоя $h = R_p + 2\Delta R_p$ составляет порядка 24.2 nm.

Как следует из примеров СЭМ-изображений, при дозе D, несколько большей $1.0 \cdot 10^{15}\,\text{ion/cm}^2$, облученная поверхность Ge перестает быть ровной и характеризуется структурой Bi:NPGe в виде множества равномерно распределенных по образцу ямок (пор) (рис. 1, *a*). При повышении D ямочная структура Bi:NPGe преобразуется в губчатую структуру ($D = 6.0 \cdot 10^{15}\,\text{ion/cm}^2$), состоящую из тонких переплетающихся нанонитей (рис. 1, *b*). Дальнейшее возрастание D до значения $4.0 \cdot 10^{16}\,\text{ion/cm}^2$ (рис. 1, *c*) качественно морфологию облученного слоя Bi:NPGe не меняет, однако при этом наблюдается заметное увеличение расстояния между нанонитями и свободного объема в пористом материале.

Для оценки изменения уровня поверхности (h) в результате распыления (h_{sputt}) или распухания (h_{swell}) образца Bi:NPGe относительно необлученной подложки *c*-Ge были проведены СЗМ-измерения. Пример СЗМ-изображения фрагмента поверхности в области перекрестия маски, сформированного при $D = 4.0 \cdot 10^{15}\,\text{ion/cm}^2$, приведен на рис. 2, *a*. Темная область перекрестия относится к поверхности исходной подложки *c*-Ge, закрываемой при имплантации маской, а светлая область отражает структуру Bi:NPGe. Из рисунка следует, что при заданных условиях ионного облучения происходит заметное распухание поверхности (увеличение объема облучаемого материала Bi:NPGe относительно исходного Ge), возрастает значение h_{swell} и образуется ступенька. На рис. 2, *b* представлена экспериментальная зависимость $h(D)$, построенная по измеренным профилям вдоль светлой линии со стрелками, как показано на примере (рис. 2, *a*). Особенности изменения h заключаются в том, что на начальном этапе облучения с ростом D до $D_{sputt} = 1.3 \cdot 10^{15}\,\text{ion/cm}^2$ происходит ионное распыление поверхности образца с монотонным понижением h_{sputt}. При превышении D_{sputt} с развитием структуры слоя Bi:NPGe ситуация меняется на противоположную: распыление прекращается и h_{swell} начинает повышаться. Очевидно, что изменение h_{swell} связано с процессом распухания облучаемого слоя.

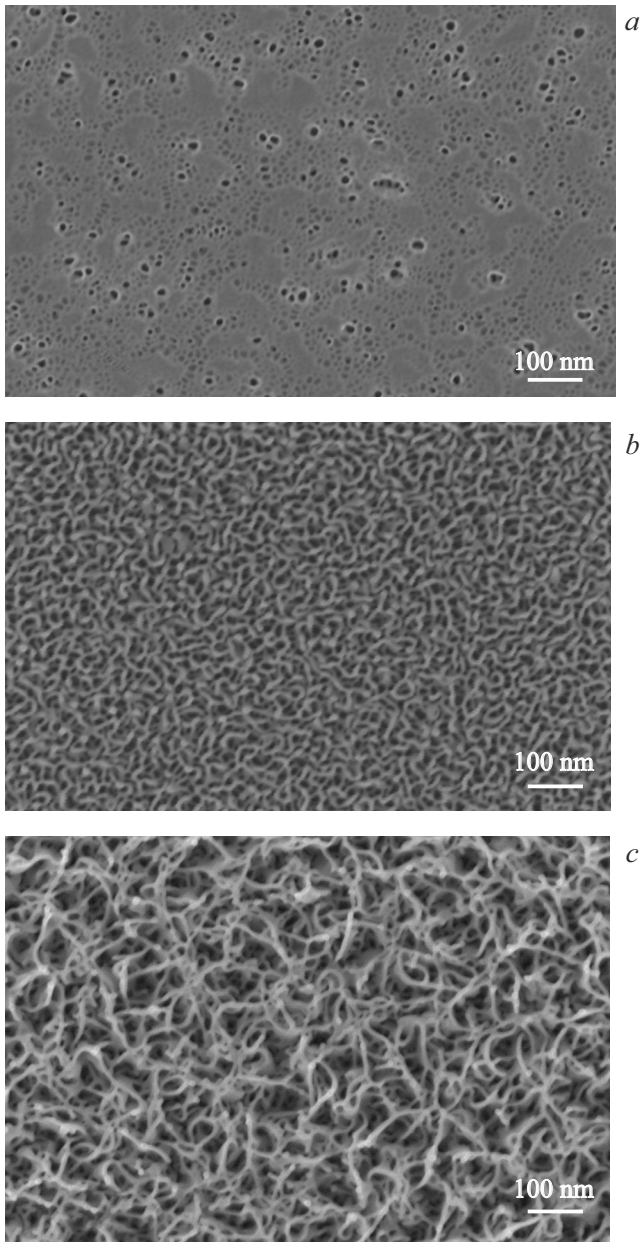


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности *c*-Ge, имплантированного ионами $^{209}Bi^{++}$ с $E = 36\,\text{keV}$ при $J = 5\,\mu\text{A/cm}^2$ и $D = 1.3 \cdot 10^{15}$ (*a*), $6.0 \cdot 10^{15}$ (*b*), $4.0 \cdot 10^{16}\,\text{ion/cm}^2$ (*c*).

Известны работы, в которых было зафиксировано монотонное увеличение h_{swell} с ростом D при имплантации *c*-Ge ионами $^{73}Ge^+$ и $^{119}Sn^+$ ($E = 150-300\,\text{keV}$, $D_{\max}$ до $2.0 \cdot 10^{16}\,\text{ion/cm}^2$) [14,15]. Другой недавно обнаруженный сценарий заключается в облучении ионами $^{108}Ag^+$ с $E = 30\,\text{keV}$, при этом последовательно с ростом D происходит распухание поверхности до значений h_{swell} порядка нескольких нанометров при достижении $D = 1.25 \cdot 10^{16}\,\text{ion/cm}^2$, сменяющееся затем эффективным ионным распылением слоя Ag:NPGe с практически

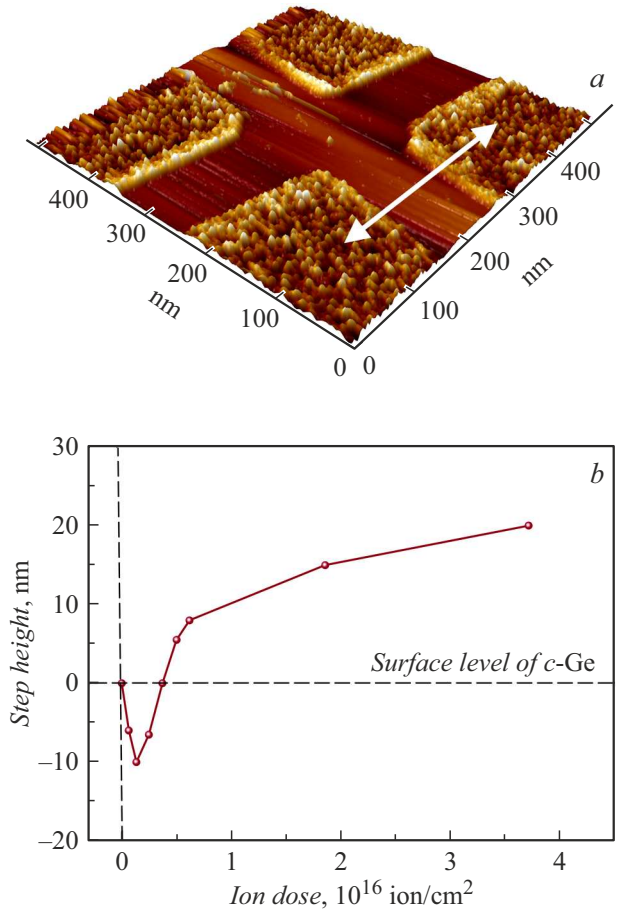


Рис. 2. *a* — СЗМ-изображение фрагмента поверхности *c*-Ge, облученной ионами $^{209}Bi^{++}$ при $E = 36$ keV, $J = 5\,\mu$A/cm^2 и $D = 4.0 \cdot 10^{15}$ ion/cm^2 через маску. *b* — зависимость от D высоты уровня поверхности, измеренной по профилю вдоль светлой линии со стрелками, как показано на СЗМ-изображении. Измеренные значения обозначены точками.

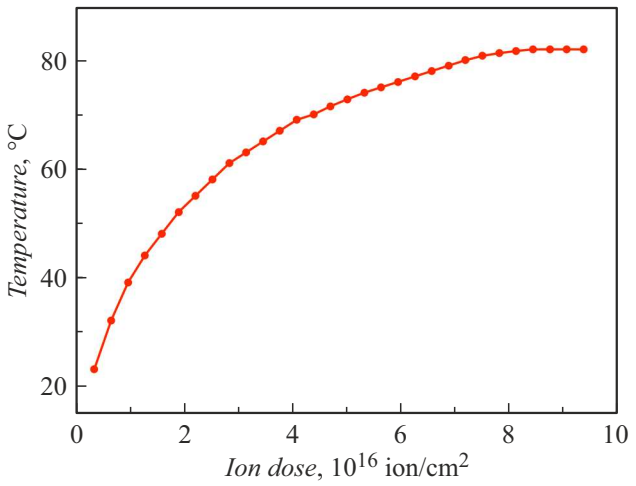


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности образца Bi:NPGe от D.

линейным увеличением h_{sputt}, как это наблюдалось до $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ion/cm^2 [16]. Установленный в настоящей работе сценарий изменения $h(D)$ при ионном облучении *c*-Ge, заключающийся в первоначальном распылении поверхности, сменяющемся ее эффективным распуханием, ранее на практике не наблюдался.

В работах [17,18] обсуждается возможный вклад T_{subst} в процессы порообразования поверхности *c*-Ge, облучаемого ионами $^{73}Ge^{+}$, для высоких значений E (до 1 MeV). Было сделано заключение, что порообразование на поверхности *c*-Ge может происходить только для T_{subst} в интервале от -50 до 200 °C. Для оценки возможного влияния нагрева образца на установленный сценарий $h(D)$ в настоящей работе были проведены эксперименты по измерению T_{subst} в течение всего процесса облучения образца. Экспериментальная зависимость $T_{subst}(D)$ приведена на рис. 3. Как следует из этого рисунка, T_{subst} к концу облучения не превышает 100 °C. Данное обстоятельство нивелирует возможный доминирующий вклад T_{subst} в определение характера концептуального сценария $h(D)$. Кроме того, в работах [13,19] было показано, что имплантация ионами $^{108}Ag^{+}$ с $E = 30$ keV нагретых подложек *c*-Ge либо их термический отжиг не приводили к появлению пор лишь при превышении $T_{subst} = 350$ °C.

Таким образом, в работе показаны структурные и топологические изменения в *c*-Ge, облученном $^{209}Bi^{++}$ при низких E. На примере полупроводника Ge на основании полученных экспериментальных данных установлена новая схема концептуального сценария взаимодействия ускоренных ионов с облучаемой матрицей, определяющая характер преобразования морфологии и уровень облучаемой поверхности с ростом D, которая заключается в последовательных сменяющихся процессах распыления и распухания.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Tolstoguzov, A.E. Ieshkin, I.N. Kutlusurin, P. Mazarov, Results Surf. Interfaces, **19**, 100491 (2025). DOI: 10.1016/j.rsurfi.2025.100491
[2] H. Zhang, M. Ma, Y. Liu, W. Zhang, C. Zhang, Manuf. Mater. Process, **9**, 158 (2025). DOI: 10.3390/jmmp9050158
[3] A. Patro, C. Sekhar Rout, S. Dhal, S. Chatterjee, Nanotechnology, **36**, 212001 (2025). DOI: 10.1088/1361-6528/adce12
[4] Y. Kudriavtsev, R. Asomoza, A. Hernandez, D.Y. Kazantsev, B.Y. Ber, A.N. Gorokhov, J. Vac. Sci. Technol. A, **38**, 53203 (2020). DOI: 10.1116/6.0000262

[5] S. An, H. Park, M. Kim, J. Mater. Chem. C, **11**, 2430 (2023). DOI: 10.1039/d2tc05041b
[6] А.Л. Степанов, В.И. Нуждин, А.М. Рогов, В.В. Воробьев, *Формирование слоев пористого кремния и германия с металлическими наночастицами* (ФИЦПРЕСС, Казань, 2019).
[7] A. Hernandez, Y. Kudriavtsev, C. Salinas-Fuentes, C. Hernandez-Gutierrez, R. Asomoza, Vacuum, **171**, 108976 (2020). DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.108976
[8] S.O. Kucheyev, J.S. Williams, C. Jagadish, J. Zou, V.S. Craig, G. Li, Appl. Phys. Lett., **77**, 1455 (2000). DOI: 10.1063/1.1290722
[9] S.S.S. Nikor, M.S.I. Sumon, S. Sankar, L. Ma, V.J. Patel, S.D. Hawkins, S.J. Addamane, S. Arafin, Appl. Phys. Express, **17**, 122005 (2024). DOI: 10.35848/1882-0786/ad9377
[10] A.L. Stepanov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, V.V. Vorobev, A.M. Rogov, Vacuum, **159**, 353 (2019). DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.10.60
[11] R. Bottger, K.-H. Heining, L. Bischoff, B. Liedke, S. Facsko, Appl. Phys. A, **113**, 53 (2013). DOI: 10.1007/s00339-013-7911-0
[12] N. Cassidy, P. Blenkinsopp, I. Brown, R.J. Curry, B.N. Murdin, R. Webb, D. Cox, Phys. Status Solidi A, **218**, 2000237 (2021). DOI: 10.1002/pssa.202000237
[13] A.L. Stepanov, S.M. Khantimerov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, A.M. Rogov, Vacuum, **194**, 110552 (2021). DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110552
[14] A.L. Stepanov, V.A. Zhikharev, D.E. Hole, P.D. Townsend, I.B. Khaibullin, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **166**, 26 (2000). DOI: 10.1016/S0168-583X(99)00641-2
[15] L. Romano, G. Impellizzeri, L. Bosco, F. Ruffino, M. Miritello, M.G. Grimaldi, J. Appl. Phys., **111**, 113515 (2012). DOI: 10.1063/1.4725427
[16] H.S. Alkhaldi, T.T. Tran, F. Kremer, J.S. Williams, J. Appl. Phys., **120**, 215706 (2016). DOI: 10.1063/1.4969051
[17] N.G. Rudawski, K.S. Jones, J. Mater. Res., **28**, 1633 (2013). DOI: 10.1557/jmr.2013.24
[18] B. Stritzker, R.G. Elliman, J. Zou, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **175-177**, 193 (2001). DOI: 10.1016/S0168-583X(00)00597-8
[19] A.L. Stepanov, B.F. Farrakhov, Y.V. Fattakhov, A.M. Rogov, D.A. Konovalov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, Vacuum, **186**, 110060 (2021). DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110060